

月面望遠鏡用鏡筒の熱膨張率測定

宮崎智行*, 鶴田誠逸, 野見山輝明*, 堀江雄二*, 花田英夫, 河野宣之

(2003年9月19日受理)

Thermal Expansion Coefficient of a Telescope Tube Prepared for Observations on the Moon

Tomoyuki MIYAZAKI*, Seiitsu TSURUTA, Teruaki NOMIYAMA*, Yuji HORIE*,
Hideo HANADA, and Nobuyuki KAWANO

Abstract

To investigate lunar origin and evolution, ILOM (In-situ Lunar Orientation Measurement) project is proposed, which launched a polar lander equipped with an optical telescope for observations on the Moon. The telescope is to be set on a polar area of the Moon, where the only one side of the tube is exposed to the Sun. Hence there occurred a temperature difference between the side exposed to the Sun and the opposite side. The temperature difference may lead to the thermal distortion of the tube, which may cause a tilt of the optical axis of the telescope. Hence the development of a telescope tube of low thermal expansion is required. In this article, measurements of the thermal expansion coefficient β of a thermal model of the telescope tube were made to obtain $\beta = (1.5 \pm 0.2) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, while the coefficient was obtained as $(1 \sim 2) \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ about three years ago. These results suggest that the tube changed its characteristics because of being kept in natural circumstance for three years. We also suggest that it is essential to study a cause of the change, e.g. humidity or others. However, these value of β is considered to satisfy a minimum condition of tilt of the optical axis, several hundred seconds. This article also proposes a method which realizes zero thermal distortion of a telescope tube without utilizing materials of zero thermal expansion, but by design.

1. はじめに

月の起源と進化の解明及び月探査に必要な技術開発を目的とした大型月探査計画 SELENE に続く次期月探査計画 ILOM (In-situ Lunar Orientation Measurement) の中に、月での月回転の直接観測がある¹⁾。しかし、月面に小型望遠鏡を設置し、位置天文観測を行うにはいくつかの技術開発が必要であり、そのひとつに光軸のずれの原因となる鏡筒の熱歪みの問題がある。

熱歪み解析用に準備された CFRP 製鏡筒の熱構造モデルを図1に示す。サイズは内径 200 mm, 外径 210 mm, 長さ 1,100 mm である。両端には厚さ 8 mm のフランジが付いており、上部フランジの直径は 260 mm, 下部フランジの直径は 320 mm である。望遠鏡の設置予定場所は極域を想定しており、鏡筒の片面だけが太陽光に曝され、太陽光が当たる

面と反対側の面との間に温度差ができる。この温度差によって鏡筒に熱歪みを生じ、光軸のずれが予想される。

図2に示したように、右側から太陽光が当たり、右側の面の長さが ΔL だけ膨張した場合を考える。

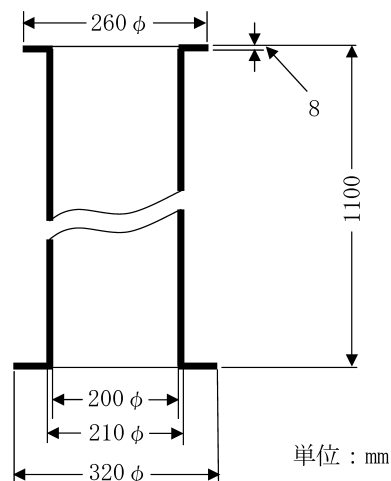


図1. 月面望遠鏡用鏡筒の熱構造モデル

*鹿児島大学工学部 (Department of Electrical and Electronics Engineering, Kagoshima University)

鏡筒の線熱膨張率として通常の金属の熱膨張率 $\beta = 11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ を使い、長さ L と直径 D をそれぞれ計画されている値 $L = 1.1 \text{ m}$ 、 $D = 0.2 \text{ m}$ とし、温度差を $\Delta T = T_R - T_L = 50 \text{ K}$ とすると、熱膨張による長さ変化 ΔL とこの熱歪みによって生じる光軸のずれ θ は、それぞれ

$$\Delta L = \beta L \Delta T, \quad (1)$$

$$\theta = \Delta L / D = 2.5 \times 10^{-3} \text{ rad} \simeq 500'' \quad (2)$$

と見積られる。PZT(写真天頂筒)型の望遠鏡で位置天文観測を行うには光軸のずれを少なくとも数百秒角以下にすることが要求されており、鏡筒の熱歪みを抑える必要がある¹⁾。

式(1)、(2)から、熱歪みによる光軸のずれを抑えるには、鏡筒に低熱膨張率の材料を用いること及び温度差を小さく抑えればよいことは明らかである。したがって、軽量で、かつ熱伝導率が良い、低熱膨張率のCFRPを鏡筒材料として選択している。また、鏡筒はMLI(Multi-Layered Insulator)で覆われ、温度差は数度以下に抑えられる。よって、光軸のずれは、要求されている数百秒以下という条件を満たすと考えられる。しかし、これは最低条件であり、観測精度を上げるために鏡筒の熱歪みを少しでも抑えることが要求されている。

国立天文台水沢観測所において、鏡体の熱構造モデルの片側側面だけを加熱して熱歪みを測定したところモデルの熱膨張率が製作直後よりも大きくなっている傾向を見いだした。そこで、鹿児島大学において別の方法で熱膨張測定実験を行った結果、製作直後よりも大きな熱膨張率を得た。この間、約3年の年月が経っている。異なる熱膨張率が得られた原因として、測定法の違い、あるいは吸湿等による鏡筒の性質の変化が考えられる。前者であれば

低熱膨張率の測定法、後者であれば衛星搭載装置等の保管法にとって重要な問題があることを示唆しており、採用した測定法と測定結果を報告する意義は大きいと思われる。本論文は、鹿児島大学で行った熱膨張率の測定結果を測定法の検討も合わせて報告する。また、我々は、必ずしもゼロ熱膨張率の材料を用いるのではなく、鏡筒の構造を工夫することによって熱歪みを除去する方法も検討してきており、その結果も述べる。

2. 熱膨張率測定システム

鏡筒の熱膨張率測定システムの概略図を図3に示す。床に置いた煉瓦の上に厚さ5mmのガラス板と厚さ24mmの発泡スチロール板を置き、その上に鏡筒を立てた。

鏡筒の熱膨張率は、下部のフランジ面に載せた石英管を基準にして上部フランジ面の変位 ΔL を渦電流式変位計(キーエンス社製 EX-200)で測定した。変位センサーの分解能は $0.4 \mu\text{m}$ である。石英管を鏡筒の下部フランジに載せているので鏡筒が置かれた底部の温度変化などによる位置変化の影響は抑えられている。鏡筒の写真を図4に、上部フ

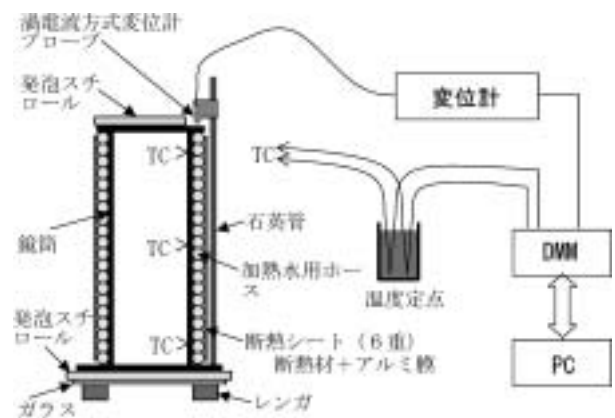


図3. 測定システム

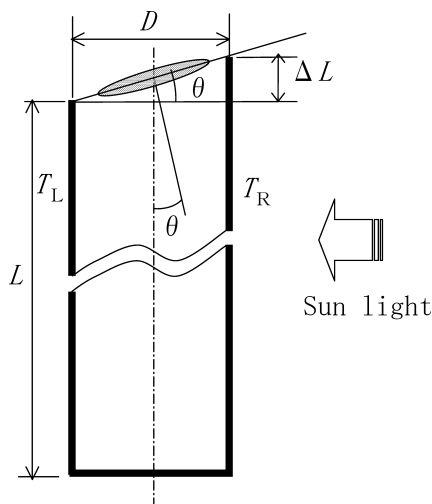


図2. 熱歪みによる光軸のずれ

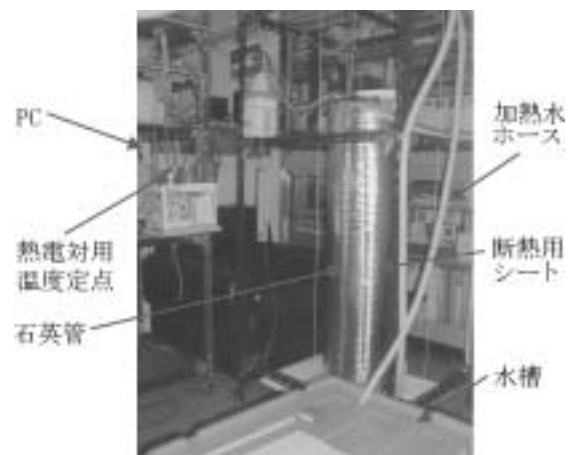


図4. 熱膨張率測定装置

ランジ付近の写真を図5に示す．広角で写真を撮っているため，石英管が鉛直に立っていないように見えるが，鏡筒及び石英管いずれも鉛直になるように設置している．後で述べるように，石英管の熱膨張を含めた測定系の温度変化が熱膨張率測定に与える影響は無視できる大きさであった．

鏡筒内や周囲の温度は銅 - コンスタンタン熱電対で測定した．鏡筒の加熱は，鏡筒にビニールホースを巻き付け，これに温水を流すことにより行った．ホースと鏡筒との間の摩擦が非常に大きかったの



図 5. 変位測定部

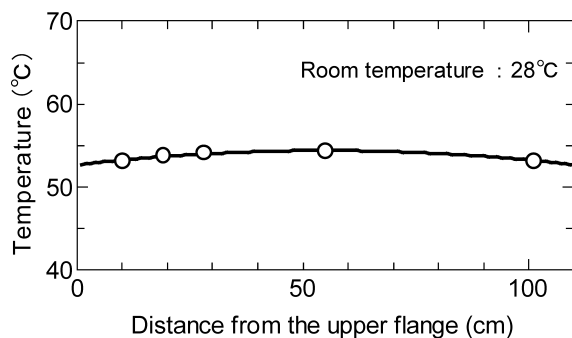


図 6. 鏡筒内の温度分布

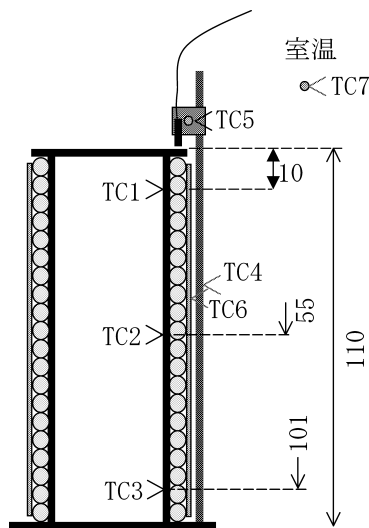


図 7. 熱電対の位置．長さの単位は cm である．

で，ホースの熱膨張が鏡筒に影響を与えることがないように，ホースと鏡筒との間に紙を挟んだ．温水は水槽からポンプで循環させ，水槽の水は温度コントローラ付きのヒーターで加熱した．この方式をとることにより，鏡筒の温度分布を約 3% 以内で一様にすることができた．鏡筒内の温度分布の測定結果の例を図 6 に示す．

鏡筒の熱膨張率測定において熱電対 TC1～7 を取り付けけた場所を図 7 に示す．熱電対 TC1～3 で鏡筒内壁の，TC4 で石英管の中間付近の，TC5 で変位計のプローブの取り付け金具の，TC6 で鏡筒に巻き付けた断熱シートの表面の，TC7 で鏡筒から約 50 cm 離れた場所の温度を測定した．TC4 と TC5 については，熱電対の振動や温度変化による変形が測定対象物に力がかかることがないように，貼り付けずに接触させるだけにした．

温度と変位は 10 回測定して，その平均値を測定データとし，1 分間隔でデータをパソコンに取り込んだ．

3. 実験結果

3.1 鏡筒の温度と変位の関係

(a) 鏡筒の温度を一方方向に変化させた場合

鏡筒の温度を室温から上げていったときの各点の温度と変位の時間変化の測定結果を図 8 に示す．熱電対 TC1～7 が示す温度を，それぞれ $T_1 \sim T_7$ としている．図 6 に示したように，鏡筒内の温度は約 3% 以内で一様なので，以下の議論では鏡筒の温度として熱電対 TC2 の温度のみを示している．

鏡筒の温度はほぼ直線的に上昇し，設定温度に達した後は，加熱用ヒーターの on-off に対応して約 35 分周期で変動している．鏡筒は，温度上昇に比例して膨張し，温度変動にも対応して膨張と収縮を繰り返す．

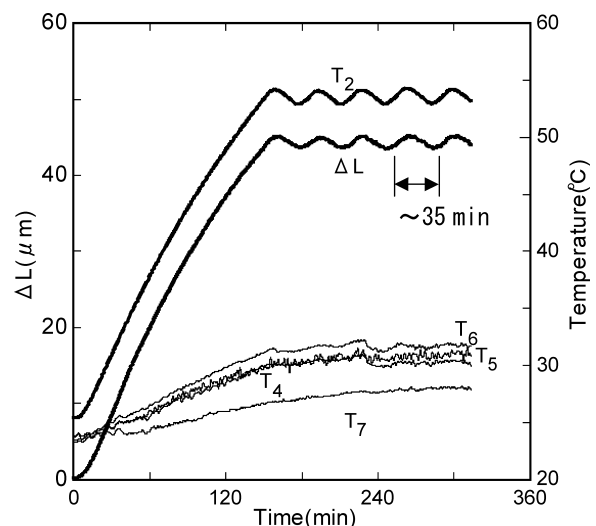


図 8. 昇温時の変位の時間変動

返している．一方，鏡筒の周りの温度 $T_4 \sim T_7$ も上昇しているが，後で述べるように，測定系の温度変化が変位の測定に及ぼす影響は無視できる大きさであった．

鏡筒の温度を 50 近くから下げていったときの各点の温度と変位の時間変化の測定結果を図 9 に示す．この場合の水の冷却は自然冷却であるため，温度上昇の時に比べて室温に戻るのに長時間を要しており，鏡筒の温度は指数関数的に下降している．

(b) 鏡筒の温度を正弦波的に変動させた場合

鏡筒の温度が設定温度に達した後の各点の温度と変位の時間変化を図 10 に示す．2 時間後，実験室の空調を冷房から暖房に変えたとき， $T_4 \sim T_7$ は急激に変化したが， T_2 及び変位 ΔL は変化しなかった．これから，室温の変化は鏡筒の熱膨張に，また変位の測定系に大きな影響を与えないことがわかる．

一方，温水用ヒーターの on-off によって鏡筒の温度 T_2 は約 35 分周期で正弦波的に変化し，これに

対応して ΔL も大きく変動している． $T_4 \sim T_7$ に見られるノイズは室温の変動を反映したものであり，鏡筒の温度 T_2 の変動よりかなり周期が短い．

3.2 温度を一方向に変えた場合の熱膨張

図 8 に示した昇温時の鏡筒の温度 T_2 と変位 ΔL の関係を図 11 に示す．線形の依存性を示しており，最小自乗法から求めた直線の傾きは $\Delta L/\Delta T_2 = 1.57 \mu\text{m K}^{-1}$ である．温度と変位の相関係数から温度変化に対する変位の応答には約 1～2 分の遅れがあることがわかったので，この時間遅れを補正してみたが直線の傾きはほとんど変わらなかった．

図 9 に示した降温時の鏡筒の温度 T_2 と変位 ΔL の関係を図 12 に示す．昇温時と同様，鏡筒の変位は線形の温度依存性を示しており，最小自乗法で求めた直線の傾きは $\Delta L/\Delta T_2 = 1.63 \mu\text{m K}^{-1}$ であった．

鏡筒の温度を一方向に昇温あるいは降温させて熱膨張を測定する実験を数回行った結果，熱膨張率と

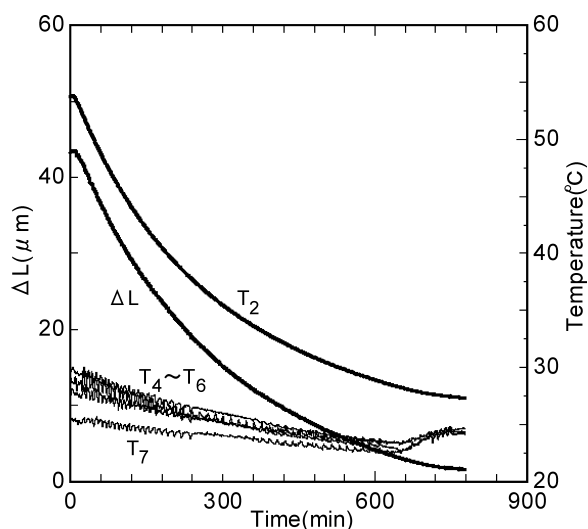


図 9. 降温時の変位の時間変化

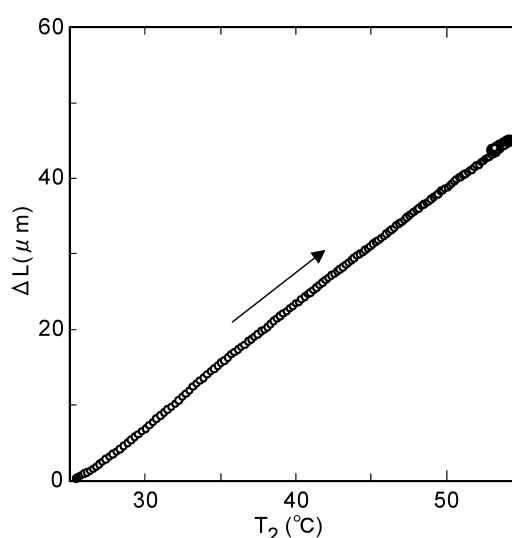


図 11. 昇温時の変位の温度依存性

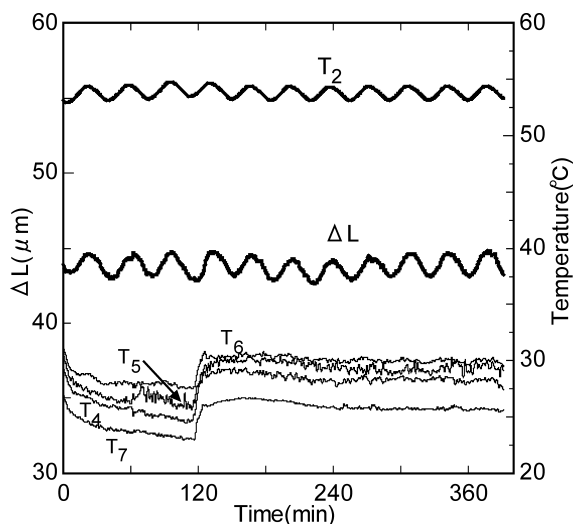


図 10. 室温変化に対する鏡筒温度と変位の応答

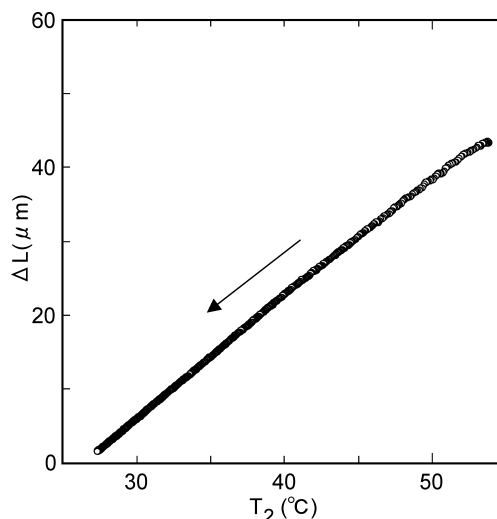


図 12. 降温時の変位の温度依存性

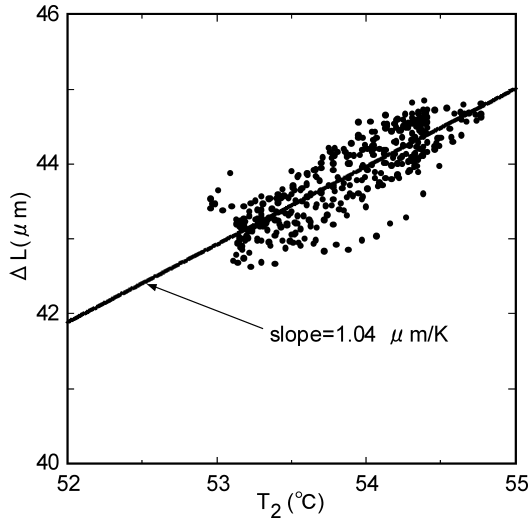


図 13. 鏡筒の温度を変動させたときの変位の応答

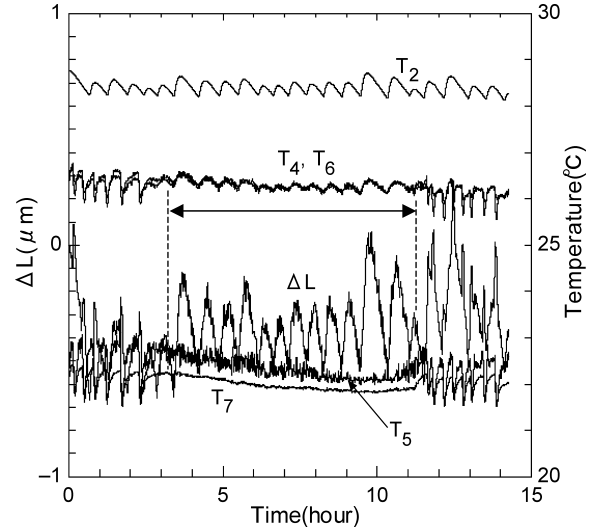


図 14. 鏡筒の温度変動と変位の変動

して

$$\beta = \Delta L / L \Delta T_2 = (1.5 \pm 0.2) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \quad (3)$$

が得られた．ここで， $L = 1.1 \text{ m}$ を用いた．

図 10 に示した鏡筒の温度 T_2 と変位 ΔL の関係を図 13 に示す．両者は正の相関を示しており，最小自乗法により求めた直線の傾きは $\Delta L / \Delta T_2 = 1.04 \mu\text{m K}^{-1}$ である．この場合も，温度変化に対する変位の時間遅れを補正しても直線の傾きはほとんど変わらなかった．温度を一方向に変化させたときの結果と比べると，温度を正弦波的に変化させたときは約 70% の大きさになっている．

4. 実験結果の考察

鏡筒の温度を正弦波的に変化させたとき，一方向に変化させた場合の約 70% の大きさの $\Delta L / \Delta T_2$ の値が得られた．これを確認するために，室温付近で鏡筒温度を振動させて熱膨張率を測定し，別の方法でデータ解析を行った．また，鏡筒の温度を変化させると測定系の温度も変化したので，この影響を調べる実験を行った．以下，これらの結果と合わせて熱膨張率の測定結果を議論する．

4.1 鏡筒の温度を振動させたときの熱膨張

熱電対 TC4 は下部フランジに，TC6 は上部フランジに取り付け，他の熱電対は図 7 と同じ所に付けた．

各点の温度と変位の変動を図 14 に示す．図中に点線で示した区間のデータに対する鏡筒内の温度 T_2 と変位 ΔL の変動， δT_2 と δL の自己相関関数を図 15 に示す．鏡筒の温度変動 δT_2 と変位の変動 δL の変動幅は，それぞれ $\langle \delta T_2^2 \rangle^{1/2} = 0.129 \text{ K}$ ， $\langle \delta L^2 \rangle^{1/2} = 0.146 \mu\text{m}$ であり，これらの量から

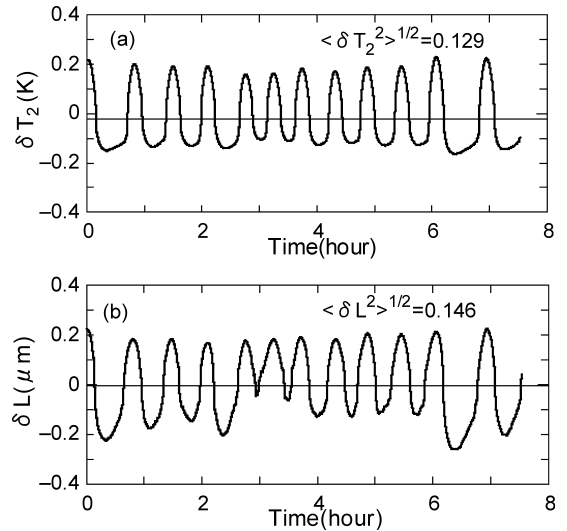


図 15. 測定データの自己相関関数．(a) 鏡筒の温度変動，(b) 変位の変動

鏡筒の温度変化に対する変位の変化を求めると， $\Delta L / \Delta T_2 = 1.13 \mu\text{m K}^{-1}$ となる．この値は，3.2 節において求めた $\Delta L / \Delta T_2 = 1.04 \mu\text{m K}^{-1}$ にほぼ一致しており，別の方法で解析しても同じように約 30% 小さい熱膨張率の値が得られた．このように，温度を振動させて熱膨張を測定する方法で小さい値が得られたのは，鏡筒内の熱拡散に伴う温度変化の時間遅れによって熱膨張が平均化されたことによると考えられる．

4.2 測定系の温度変化の影響

石英管や変位計プローブ付近の温度変化による熱膨張率の測定誤差を見積もるために，鏡筒の温度を約 27.5 に設定し，5 分ごとに空調を冷房と暖房に切り替えることで室温を大きく変動させて熱膨張率の測定実験を行った．熱電対の取り付け位置は，

4.1 節の場合と同じである．得られた各点の温度と変位を図 16 に示す．鏡筒内の温度 T_2 はほとんど変化しないが， $T_4 \sim T_7$ が大きく変化していることがわかる．したがって，この場合に得られる変位の変動は測定系の温度変化の影響と見なすことができる．

変位計プローブ付近の温度 T_5 と変位 ΔL の変動， δT_5 と δL の自己相関関数を図 17 に示す．温度変動 δT_5 と変位変動 δL の変動幅は，それぞれ $\langle \delta T_5^2 \rangle^{1/2} = 0.345 \text{ K}$ ， $\langle \delta L^2 \rangle^{1/2} = 0.0349 \mu\text{m}$ であり，測定系の温度変化に対する変位の変化として，

$$\Delta L / \Delta T_5 = 0.10 \mu\text{m K}^{-1} \quad (4)$$

が得られる．

図 8 と 9 に示したように，鏡筒の温度を変化させたときの周辺の温度変化は約 20% 以下であることを考慮すると，鏡筒の温度変化によって測定系の温

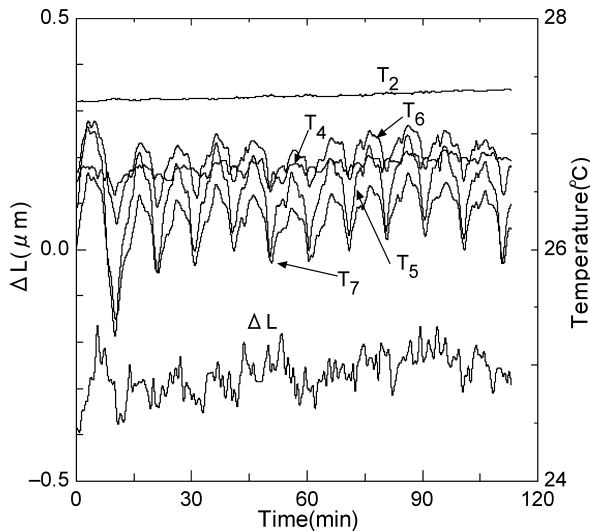


図 16. 変位計プローブ付近の温度変動と変位の変動

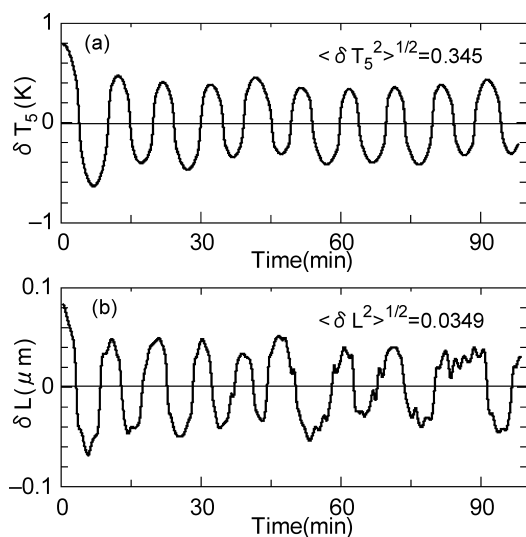


図 17. 測定データの自己相関関数．(a) 変位計プローブ付近の温度変動，(b) 変位の変動

度が変化する影響は約 2% 以下であると見積もることができる．この値は，鏡筒の温度変化に対して得られた式 (3) の膨張率のばらつきの約 10% の大きさである．このように，鏡筒の温度変化によって測定系の温度が変化する影響はほとんど無視できることがわかる．

4.3 鏡筒の熱構造モデルの熱膨張率

式 (2) と (3) から，熱膨張率の実験値として $\beta = (1.5 \pm 0.2) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ と見積もることができる．しかし，この値は，鏡筒を製作したメーカーが出した値 $(1 \sim 2) \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ と比較して一桁大きい．原因として，鏡筒が製作後に水分を含んだことが考えられる．

温度 60°C ，相対湿度 95% のチャンバー内に 7 日間置いた結果 $2.5 \times 10^{-6} \text{ ppm}$ 膨張し，重量が 0.151 w% 増加したという報告がある²⁾．95% という値は湿度としては大きな値ではあるが，通常環境に長時間置いた場合でも十分吸湿することが予測される．水分がカーボンファイバと樹脂の間に入った場合，熱膨張率が増加することは予測される．今後，吸湿と熱膨張率の関係及びベーキングの効果を調べる必要がある．

4.4 鏡筒の熱歪みの除去法

一般に，負の熱膨張率をもつファイバを利用して FRP の熱膨張を小さく抑えることがなされている^{2,3)}．ここでは，必ずしもゼロの熱膨張率をもつ材料を利用するのではなく，鏡筒の構造を工夫することで熱歪みを抑える方法を議論する．原理図を図 18 に示す．鏡筒は三つの円筒からなり，中間にある円筒 B の熱膨張と円筒 A, C の熱膨張を相殺させるものである．

今，ある温度 T_0 のとき光軸のずれがないと仮定

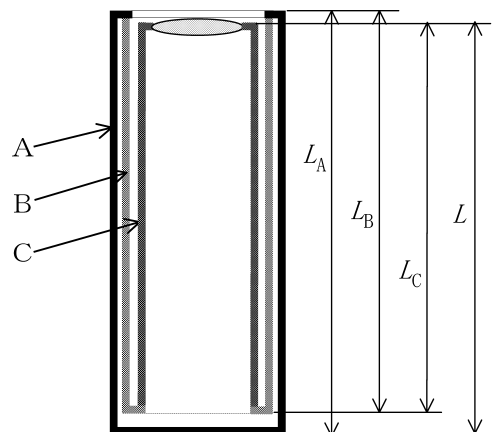


図 18. 熱膨張率異なる 3 つの円筒からなる鏡筒

し、円筒 A, B, C のそれぞれの長さを L_A , L_B , L_C とし、鏡筒の底面とレンズを置く筒 C の上部との距離を L とすると

$$L = L_A - L_B + L_C \quad (5)$$

である。この状態から、ある側面の温度が ΔT 変化し、 $T = T_0 + \Delta T$ になったときのレンズの位置の変化 ΔL は、円筒 A, B, C の線膨張率 β_A , β_B , β_C を使って

$$\Delta L = L_A \int_{T_0}^T \beta_A(T) dT - L_B \int_{T_0}^T \beta_B(T) dT + L_C \int_{T_0}^T \beta_C(T) dT \quad (6)$$

$$= (L_A \bar{\beta}_A - L_B \bar{\beta}_B + L_C \bar{\beta}_C) \Delta T \quad (7)$$

と与えられる。ここで、月面での温度変化は緩やかであることと熱輻射による熱伝達が大いことから、円筒 A, B, C の側面の温度はほぼ同じであると仮定している。 $\Delta L = 0$ であるようにするには、式 (7) から

$$L_B \bar{\beta}_B = L_A \bar{\beta}_A + L_C \bar{\beta}_C \quad (8)$$

であればよいことがわかる。すなわち、円筒の長さ L_A , L_B , L_C とそれらの線膨張率 $\bar{\beta}_A$, $\bar{\beta}_B$, $\bar{\beta}_C$ が式 (8) を満たすように選ぶことによって鏡筒の熱歪みをゼロにし、光軸のずれを生じさせないようにできることになる。

しかし、この方法では重量が増すことと月面着陸時の衝撃に耐えられる構造にすることが問題であり、3 つの FRP の線膨張率の温度依存性と経年変化が同じでなければならない。

5. むすび

月面望遠鏡として準備されている鏡筒の線熱膨張率としては $\beta = (1.5 \pm 0.2) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ と見積もることができた。この膨張率であれば、熱歪みによる光軸のずれを月での位置天文観測に必要な条件を満たすようにはできると考えられる。しかしこの値は鏡筒製作直後に測定された値 $(1 \sim 2) \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ と比較して一桁近く大きい。これらの結果は、鏡筒

が製作後から今回の測定の間の約 3 年間にわたって自然環境にさらされたため、熱膨張率が変わったと考えられる。今後、熱膨張率の変化の原因を明確にすることは、熱膨張率の小さい材質の測定法や衛星搭載装置の保管法にとって重要であることが示唆される。

熱膨張率が異なる 3 つの円筒で鏡筒を構成する方法は、必ずしもゼロ熱膨張の FRP を製作する必要はない点において有利である。同じ樹脂の FRP であれば熱膨張率の温度依存性は互いに似たものになると思われるので、ファイバーの方向を変えるだけで式 (8) を満たすような 3 種類の FRP を選択、あるいは製作することは比較的容易と思われる。

今後の課題として、月面での重力は地球の 1/6 であることから鏡筒自身の重力の影響を取り除いた実験として、鏡筒を横にした状態での熱膨張率測定、および、鏡筒に含まれた水分が熱膨張に与える影響、及びベーキングの効果の検討をする予定である。また、3 つの円筒で鏡筒を構成する場合の重量軽減と月面着陸時の衝撃に耐えられる構造の検討も予定している。

参考文献

- 1) 花田英夫, 日置幸介, 河野宣之, 大江昌嗣, 坪川恒也, 鶴田誠逸, 荒木博志, 松本晃治, 高根沢隆, 河野裕介, 唐牛 宏, 板垣春昭, 岩田隆宏, 金子 豊, 横山隆明: ILOM (月面位置天文観測) 計画の技術開発, 次期月探査シンポジウム講演集, pp. 54-58 (1999).
- 2) T. Ozaki, C. Ikeda, M. Isoda and S. Tsuneta: A new high thermal-conductivity composite material for high-precision space optics, *Intl Symp. Optical Science, Engineering, and Instrumentation*, SPIE's Annual Meeting, Aug. 4-9, Denver, USA (1996).
- 3) T. Kashima, A. Yamanaka, S. Nishijima and T. Okada: Thermal strain of pipes composed with high strength polyethylene fiber reinforced plastics at cryogenic temperatures, *Adv. Cryogenic Eng.*, **42**, 147-154 (1996).